



Thermographie infrarouge : diagnostic des centres de stockage de déchets

C. Sirieix, L. Rouvreau, C. Bloquet

► To cite this version:

C. Sirieix, L. Rouvreau, C. Bloquet. Thermographie infrarouge : diagnostic des centres de stockage de déchets. Pangea infos, 1998, 29/30, pp.36-43. insu-00957491

HAL Id: insu-00957491

<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-00957491>

Submitted on 10 Mar 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THERMOGRAPHIE INFRAROUGE : DIAGNOSTIC DES CENTRES DE STOCKAGE DE DÉCHETS

Infrared thermography: diagnostic and monitoring method in waste landfills

C. SIRIEIX *, ***, L. ROUVREAU *, C. BLOQUET **

* ANTEA, 10 rue Henri Picherit, 44071 Nantes cedex 03 (France) E-mail l.rouvreau@antea.brgm.fr

** France Déchets, Avenue Jean Jaurès, 78440 Gargenville (France)

*** Actuellement au CDGA, Université Bordeaux 1, Avenue des Facultés, 33405 Talence (France) E-mail sirieix@station1.cdga.u-bordeaux.fr

RÉSUMÉ

La législation française imposant un suivi et un contrôle des centres de stockage des déchets, des méthodes de caractérisation se développent. On se propose de démontrer l'intérêt d'utiliser la thermographie pour réaliser ce type d'études. Après avoir exposé les conditions particulières de mise en œuvre de cet outil sur un site naturel, deux exemples d'application seront montrés. Le premier concerne la localisation des foyers en combustion sur un site. Le second concerne la localisation des zones à fortes activités thermiques. Afin d'établir le lien entre activité chimique et activité thermique, des mesures simultanées de ces deux paramètres ont été réalisées sur un site. Les résultats obtenus par ces deux méthodes sont discutés et comparés. Un inventaire des champs d'application de cette méthode dans un contexte français est finalement proposé.

ABSTRACT

Since French legislation requires monitoring and inspection of waste landfills, methods of characterization are being developed. It is proposed to demonstrate the advantage of using thermography for this kind of study. After explaining the particular conditions for using this tool on a natural site, two examples of application will be shown. The first one concerns the location of origins of fires at a site. The second one concerns the location of areas with strong thermal activity. To establish the link between chemical activity and thermal activity, simultaneous measurements of these two parameters were made on one site. The results obtained by both methods will be discussed and compared. A range of fields of application for this method in a French context will finally be proposed.

INTRODUCTION

L'instauration en France d'une législation de plus en plus stricte en ce qui concerne la gestion et le stockage des déchets a conduit d'une part à la création d'une nouvelle génération de stockages et d'autre part à la réhabilitation ou la fermeture des sites plus anciens. Si la notion de stockage de déchets est définie en tant que concept par les textes réglementaires, et s'il est possible d'exprimer et de quantifier (au moins partiellement) les relations entre la masse de déchets et le milieu environnant (principalement pour les nouvelles installations), la masse de déchets reste bien souvent une boîte noire, siège de processus physico-bactério-chimiques complexes et intenses. En d'autres termes, si la connaissance et la définition du contenant ont notablement progressé ces dernières années, les études relatives au contenu et à

son évolution dans le temps ont progressé beaucoup plus lentement. A défaut de pouvoir maîtriser ces processus, il peut apparaître utile d'apprécier, au moins qualitativement, leur intensité et de pouvoir suivre leur évolution. Une démarche de surveillance peut mettre en évidence une augmentation anormale de l'activité, ou au contraire permettre de vérifier que cette activité décroît dans le temps (évolution a priori logique si le degré de maturation des déchets fermentescibles évolue dans le temps).

Les gestionnaires et exploitants des centres de stockages de déchets sont souvent confrontés à de grandes difficultés pour caractériser 'l'activité' du site et son évolution dans le temps. L'activité thermique est directement liée d'une part aux éventuelles combustions internes du site et d'autre part aux réactions exother-

miques qui affectent les déchets et se manifestent en particulier par la production ou l'accumulation de bio-gaz. Un bilan de cette activité chimique pourrait être réalisé par thermographie infrarouge, comme essayent de le démontrer Mazzoni *et al.* (1993) et Chiaranti *et al.* (1995).

Après avoir développé les conditions d'utilisation de cette méthode, deux types de mesures seront présentés. Le premier exemple concerne l'application de cette méthode à la localisation de zones en combustion sur un site. Un deuxième exemple présentera la comparaison entre un levé par thermographie infrarouge et une campagne de mesures d'émissions de gaz en surface réalisées simultanément sur un même site. Les cartographies obtenues par les deux méthodes ont été comparées et discutées. Ce second exemple est issu d'un programme expérimental conjoint France Déchets-Antéa. Ce programme a pour objectif de vérifier sur le terrain le lien existant entre activités chimiques et activités thermiques.

UTILISATION DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE SUR UN SITE DE STOCKAGE DE DÉCHETS

Principe de la méthode

La thermographie infrarouge est une technique d'auscultation non destructive, sans contact, utilisée de façon passive dans ce cas précis. Elle permet, à partir de mesures de température effectuées sur un milieu, de réaliser une carte de la température de surface. La caméra infrarouge transforme un signal photonique (ou rayonnement thermique émis par le milieu et donc fonction de la température de surface) en un signal électrique qui peut être exploité et mesuré. La température de surface du site est directement liée aux variations de température sous-jacentes et donc, dans le cas considéré, à celle des déchets.

Flux mesuré par une caméra infrarouge sur un site de stockage de déchets

Dans un cas général, l'énergie rayonnante totale captée par une caméra infrarouge résulte de la contribution des flux suivants (Caniou, 1991) :

- le flux provenant de la scène thermique auscultée (la surface étudiée) et émis par thermorayonnance ;
- le flux provenant d'une source secondaire vue par transparence à travers la scène thermique ;
- le flux provenant d'une autre source secondaire, vu par réflexion sur la scène ;
- le flux dû à la thermorayonnance de l'atmosphère ou

de la couche gazeuse comprise entre la scène étudiée et la lentille de la caméra. De plus cette couche gazeuse est également responsable de l'atténuation d'une partie des différents flux sur leur trajet respectif.

Dans le cas d'un centre de stockage de déchets, la mesure sera essentiellement due au flux provenant de la surface du site donc de sa température –paramètre qui nous intéresse directement– et des flux engendrés par des réflexions que l'on considérera comme des artefacts. L'influence de la couche gazeuse sera négligeable pour des distances scènes-capteur aussi faibles (généralement inférieures à 100 m), sauf dans le cas d'émission de gaz particulier non transparent dans la bande spectrale utilisée (cas par exemple des rejets au droit d'une torchère).

La part du flux dû à la thermorayonnance et la part due à la réflexion sont étroitement liées. Les coefficients d'émissivité $\varepsilon(\lambda)$ et de réflectivité spectrales $\mathcal{R}(\lambda)$ sont liés pour des corps opaques selon la loi suivante in Gaussorgues (1989) :

$$\varepsilon(\lambda) + \mathcal{R}(\lambda) = 1 \quad (1)$$

Dans le cas des centres de stockages de déchets, la part du flux réfléchi devient importante essentiellement sur les surfaces ou talus inclinés. En effet, les matériaux de surface (sols, remblais, géotextiles, herbe...) ont une forte émissivité, supérieure à 0,8 donc une faible réflectivité pour une incidence de prise de vue normale. Sachant que le flux dû à la thermorayonnance du milieu est fonction de la température du milieu et de son coefficient d'émissivité pour une bande spectrale donnée et que la réflectivité représente la complémentaire, la valeur du coefficient d'émissivité est primordiale. Dans la bande spectrale utilisée et pour des matériaux isolants et rugueux, l'émissivité varie avec l'angle d'incidence. A titre d'exemple, le coefficient d'émissivité d'une argile est de 0,88 pour un angle de 0° (incidence normale) diminue à partir de 50° pour finalement atteindre 0,5 à 80° (De Vriendt, 1982).

Nous avons pu vérifier que dans le cas d'un talus incliné, la température apparente mesurée est bien supérieure à la réalité puisqu'elle résulte de la somme du flux émis par la scène et du flux lié aux réflexions du rayonnement solaire. Dans le cas présenté en Figure 1, sur le talus la température de surface mesurée par la caméra infrarouge est supérieure à 25°C alors qu'au sol, elle est de 13°C. La position du soleil était Sud-Est pendant le vol, soit une incidence perpendiculaire au talus. Sur la partie plate du site (incidence normale), la température apparente mesurée par la caméra est voisine de la température réelle du terrain.

Une des contraintes de ces mesures est donc d'essayer de conserver une incidence normale entre le capteur et le site étudié. Quand cela est impossible, il devient alors nécessaire de réaliser des mesures à diverses périodes de la journée afin de diminuer l'influence des réflexions solaires en fonction de la position relative du soleil par rapport aux surfaces inclinées.

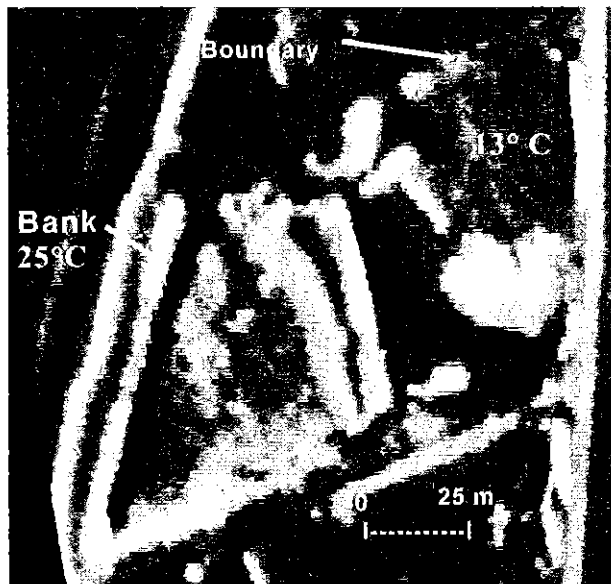


Fig. 1 – Exemple d'image thermique d'un stockage de déchets. Rôle du talus.

Caractéristiques du dispositif de mesure utilisé

La caméra utilisée possède une résolution thermique (MTD) de $0,1^{\circ}\text{C}$ et une précision de 2°C . Elle opère dans la bande spectrale $2 - 12\mu\text{m}$. La résolution spatiale (définition au sol) est de $1,8\text{ mrad}$ soit $0,18\text{ m}$ à 100 m de distance (scène-capteur), dans sa configuration standard. Ces valeurs correspondent aux caractéristiques normalisées établies pour les caméras infrarouges et dont les principes sont détaillés dans Pajani (1989).

La taille du champ étudié et la définition au sol dépendent d'une part de la distance entre la caméra et le plan de mesure et d'autre part de l'objectif utilisé.

Les données présentées ont été acquises au moyen d'un objectif grand angle à 40 et 80 m d'altitude. Les scènes réalisées ainsi couvrent donc respectivement $30\times 20\text{m}$ et $60\times 40\text{m}$ avec une définition au sol de $0,15\text{ m}$ et $0,3\text{ m}$. Le terme de résolution spatiale doit être entendu non pas comme la dimension de la plus petite surface sur laquelle une mesure de la température puisse être réalisée mais comme la plus petite dimension détectable par la caméra (Fonction de réponse à une Fente pour 50% du signal). L'altitude de vol devra donc pour chaque site être fixée en fonction de la dimension

des anomalies recherchées. Par exemple, nous avons constaté que la recherche de fuites dans le réseau de drainage de biogaz nécessite des vols à basse altitude, inférieure à 40 m dans cette configuration de la caméra.

Le signal analogique, enregistré en continu pendant toute l'intervention, est ensuite numérisé au moyen d'une carte de digitalisation et d'un logiciel spécifique implanté sur micro-ordinateur. Le document obtenu est une image thermique en noir et blanc, sur laquelle les variations de niveaux de gris représentent les variations de température sur tout l'espace étudié (ou scène thermique). Dans notre cas, l'image est numérisée sur 512×512 pixels et sur 256 niveaux de gris. La définition de ces images est supérieure à celles du signal délivré par le capteur. Les mesures devront être réalisées sur des surfaces de l'image correspondant à la résolution spatiale du capteur et non pas sur un pixel. De même, les valeurs mesurées seront significatives pour des écarts supérieurs à la résolution thermique soit $0,1^{\circ}\text{C}$.

Ce document peut ensuite être traité afin d'en améliorer la qualité visuelle, de diminuer le bruit, d'améliorer la résolution thermique, d'effectuer des mesures de température de surface (Sirieix, 1994), de comparer des images acquises à différents moments ou bien encore pour être édité en fausses couleurs (Sirieix & Rouvreau, 1997). Un enregistrement vidéo réalisé simultanément dans le spectre visible permet de mémoriser le site, de corriger les artefacts éventuels et de repositionner au mieux les anomalies thermiques observées.

Réalisation des mesures

L'ensemble du dispositif est de mise en œuvre facile sur le terrain et fonctionne de façon autonome. Les images thermiques doivent être acquises à une certaine altitude variant de 30 m à 300 m en fonction des objectifs. La mise en œuvre des mesures à partir de points fixes (par exemple à partir de buttes, bâtiments avoisinants) a pour conséquence de créer beaucoup de distorsions géométriques et de favoriser les réflexions. Il nous est apparu que les conditions optimales de mesure sont obtenues à partir d'un hélicoptère. Son utilisation offre une grande souplesse et permet de réaliser des vues générales ou de détail à différentes altitudes sous une incidence optimale. Les altitudes de vol et l'orientation de l'hélicoptère peuvent être adaptées en cours de mesure si besoin.

L'utilisation d'une caméra présente l'avantage par rapport à celle d'un scanner embarqué à bord d'un avion de positionner pendant le vol les zones critiques et d'effectuer un contrôle immédiat au sol. Une utilisation conjointe d'une caméra visible couvrant le même champ permet de faciliter le positionnement.

L'ensemble du dispositif de mesure et son alimentation électrique (Fig. 2) doivent être embarqués à bord d'un hélicoptère 4 places (par exemple Ecureuil, Alouette, Bell 206). L'hélicoptère peut être équipé en 1h30 environ et la durée des mesures est d'environ 20 mn pour une surface de 1 ha.

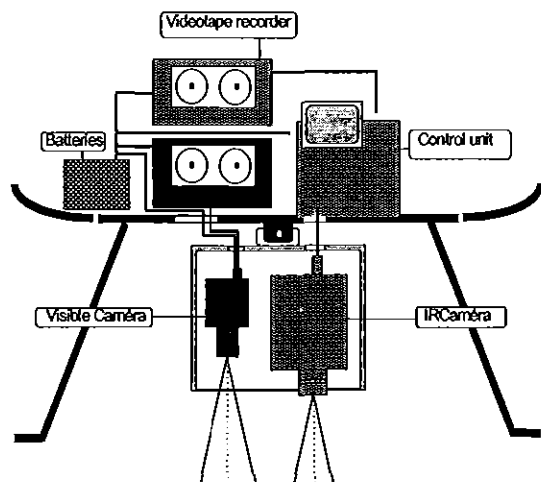


Fig. 2 - Schéma de mise en place du dispositif de mesure à bord d'un hélicoptère (Bertrand et al., 1997).

Conditions de réalisation des mesures

Les mesures doivent être réalisées par temps non pluvieux, sans vent important et sans brouillard, d'une part pour que l'hélicoptère puisse voler, et d'autre part pour ne pas augmenter l'absorption atmosphérique du rayonnement thermique par les molécules d'eau.

Sur le principe, pour éviter les réflexions solaires, des mesures de nuit seraient préférables. Nous considérons cependant qu'il est primordial d'acquérir des images visibles du site en simultané afin de repérer ultérieurement tous les parasites (véhicules, personnels, arbres...) et assurer un positionnement plus précis des anomalies thermiques. Ce choix impose donc les contraintes que nous avons développées précédemment (p. 37).

Les mesures sur un stockage de déchets peuvent être réalisées à tout moment, c'est-à-dire tout au long de l'année et de la journée puisque l'on cherche à mettre en évidence des activités exothermiques. Les conditions de mesure sont donc moins restrictives que lors d'une campagne de caractérisation du sous-sol qui repose sur les variations temporelles de la température de l'air ambiant pour localiser des objets d'inertie thermique différente de celles du milieu encaissant (Gourry et al., 1995 ; Tabbagh, 1983). L'altitude de vol sera fixée en fonction de la dimension de l'objet à détecter. Des vols

trop bas imposent une multiplication des images thermiques et donc du volume de données à traiter. De ce fait, il est primordial de définir préalablement les objectifs de la campagne de mesure.

MISE EN ŒUVRE DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE POUR LA DÉTECTION DE ZONES EN COMBUSTION

Cette méthode a été mise en œuvre plusieurs fois pour détecter des foyers en combustion sur des centres de stockages de déchets ou d'anciens terrils (Sirieix et al., 1996). Elle est tout à fait indiquée pour détecter, localiser les foyers et surtout pour mesurer leur étendue. Sur l'exemple présenté en Figure 3, nous avons pu remarquer que le foyer était circonscrit sur une zone d'environ 15 m de long et 8 m de large. La profondeur du casier est d'environ 4 m. Par contre d'autres foyers de dimensions plus faibles ont été repérés sur ce site. La différence de température mesurée au moyen des images thermiques, entre le terrain naturel et les zones en combustion, est largement supérieure à 10°C.

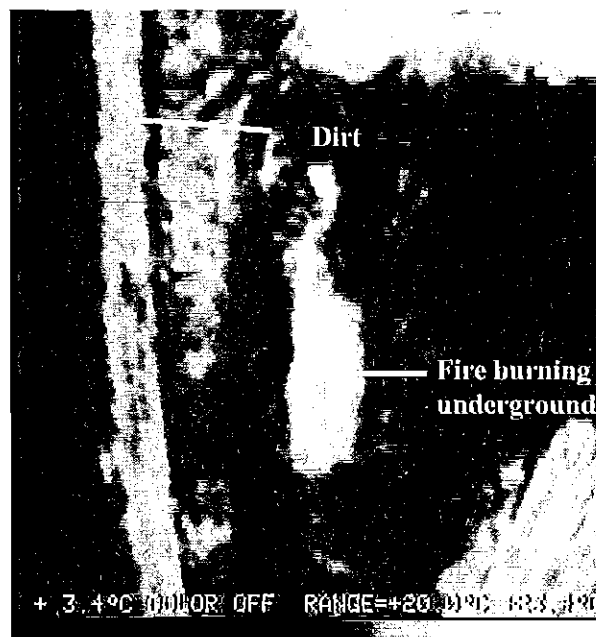


Fig. 3 - Image thermique d'un foyer en combustion.

Cet écart important de température de surface permet de distinguer les zones en combustion des zones à fortes activités chimiques. En effet, ce type de reconnaissance est réalisé sur d'anciennes décharges non équipées en réseau de drainage de biogaz et avec une activité chimique très hétérogène sur l'ensemble du site. Cette activité chimique engendre aussi des élévations de température mais généralement inférieure à 10°C

UTILISATION DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE POUR LA CARACTÉRISATION DE L'ACTIVITÉ EXOTHERMIQUE D'UN SITE

Description du site

Le site expérimental (France Déchets) reçoit des déchets de classe 1. La campagne de mesure a été concentrée sur quatre zones particulières identifiées par l'exploitant (trois correspondant à des dépôts de déchets ménagers, et la dernière à un tas de scories). Les zones de déchets ménagers sont recouvertes d'une couche de matériau argileux et de terre végétale.

Principe des mesures de gaz

Pendant que les mesures par thermographie infrarouge étaient réalisées, des mesures de teneur en gaz étaient conduites au sol pour localiser et quantifier les dégagements gazeux (biogaz). Cette mesure consiste en une recherche des émanations gazeuses de surface, détectées à l'aide d'un appareillage de détection de fuites par ionisation de flamme de type IONIFLAM. L'appareil est étalonné sur le méthane. Sa plage de validité est comprise entre 1 et 10 000 ppm de CH₄ (10 000 ppm correspond à 1 % en volume). Les échos des émanations de surface ainsi obtenus permettent d'établir une cartographie des émissions gazeuses par interpolation entre les différentes valeurs mesurées (couverture, failles, périphérie...).

Comparaison des mesures thermiques et des mesures d'émanation de biogaz

Les deux méthodes ont mis en évidence l'hétérogénéité du milieu étudié. Les écarts thermiques entre le terrain naturel à 17°C et la surface du site de stockage de déchets sont supérieurs à 1°C. Les anomalies identifiées par thermographie infrarouge montrent un écart allant de 3 à 10°C. Ces variations de température apparente ont été confirmées par des mesures ponctuelles réalisées au sol, à environ 3 cm de profondeur, le même jour grâce à un thermomètre.

Les mesures de teneur en gaz montrent des émanations variables de méthane classées entre 50 et 5 000 ppm.

La comparaison des données thermiques et des émissions de biogaz montre tout d'abord une forte corrélation entre les émanations de gaz et l'augmentation de la température de surface. La localisation spatiale des anomalies mises en évidence par les deux techniques est globalement identique. Dans le détail, les limites et la forme géométrique diffèrent et certaines anomalies ne sont pas détectées par les deux méthodes.

Nous développerons dans cet article l'étude d'une zone particulière représentative de la bonne corrélation entre mesure thermique et gazeuse. Cette surface de forme triangulaire est caractérisée par une anomalie principale mise en évidence par les deux méthodes (Fig. 4 et 5).

Au centre de gravité de cette anomalie, des écarts de température apparente de 10°C sont mesurés et les mesures d'émanations de gaz sont comprises entre 3 000 et 5 000 ppm. Autour de cette première anomalie, des élévations de température voisine de 5°C ont aussi été mesurées ainsi que des valeurs d'émanations de gaz comprises entre 1 000 et 3 000 ppm. Les limites de cette deuxième classe d'anomalies ne sont pas identiques pour les deux méthodes et certains points chauds de faible dimension ont été identifiés. De plus, les canalisations traversant la route sont mises en évidence par thermographie.

Le fait que les contours des anomalies ne soient pas identiques pour les deux méthodes s'interprète par la différence de résolution spatiale. La définition spatiale obtenue par thermographie est bien supérieure à celle obtenue par cartographie de gaz. Ceci est lié à la nature même de la mesure : dans un cas, une image complète de la température du site est réalisée ; dans l'autre cas les mesures sont ponctuelles avec un maillage variable, ici 1m×1m. La cartographie des mesures de teneur en gaz est obtenue à partir d'une interpolation entre les valeurs mesurées. La densité du maillage joue donc un rôle essentiel dans la précision de la restitution des données d'émanation de gaz. Les contours des zones à émanation gazeuse seront donc lissés. Un exemple extrême de cette différence de résolution est la non-détectabilité d'une émanation trop ponctuelle. Ainsi une fuite de gaz très ponctuelle (< 0,5 m), à proximité d'un collecteur de biogaz défectueux, a été décelée par thermographie alors que rien n'a été mesuré au cours de la campagne de mesure de biogaz.

Sur l'ensemble du site, on retiendra que pour des émanations gazeuses très importantes (> 3000 ppm), les élévations de température sont aussi importantes (> 8°C). Par contre, il apparaît difficile d'établir une classification des températures corrélables aux classes d'émanations gazeuses.

Dans un seul cas sur l'ensemble du site, une surface de dimension importante a été classée comme anomalie par thermographie alors qu'aucune variation de teneur en gaz supérieure au seuil de 50 ppm n'a été mesurée. Cette surface est située sur un des flancs d'un tumulus sur lequel on observe une végétation clairsemée et rase au droit de la zone anomalique. Nous émettons l'hypothèse que cela traduit une activité chimique localement plus

élevée des déchets, mais nous n'arrivons pas à interpréter le fait que celle-ci ne soit pas associée à une production importante de biogaz.



Fig. 4 – Image thermique du site triangulaire.

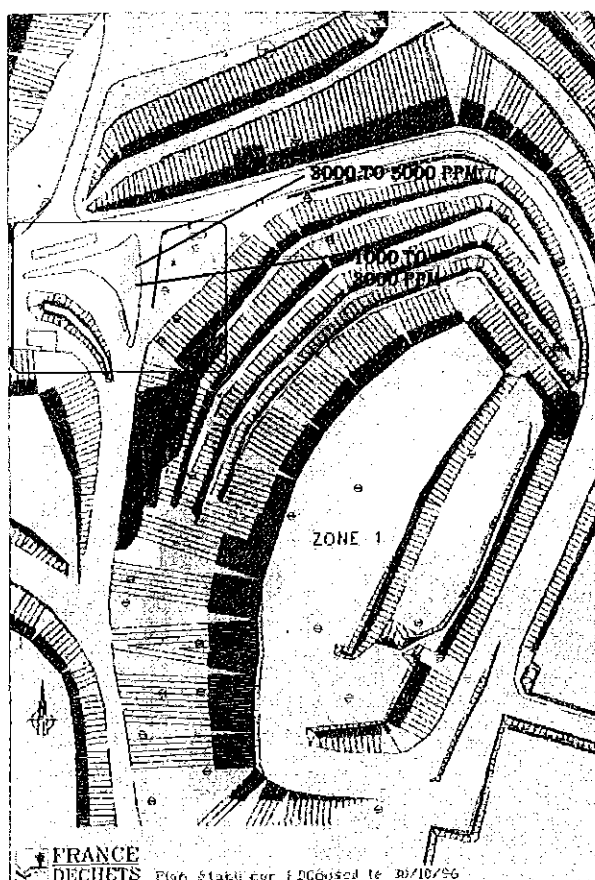


Fig. 5 – Carte des émanations de gaz de surface.

Un levé thermique et des mesures de teneur en gaz ont été réalisées sur un tas de scories encore chaudes,

stockées sur le site, à titre de contre-exemple. Les scories ont généré une anomalie thermique importante (température supérieure à 35°C) alors qu'aucune trace de gaz n'a été détectée (ce type de déchets ne contient pas de matières fermentescibles).

L'établissement d'un lien entre les isothermes et les isovaleurs de teneur en gaz nécessiterait une analyse plus détaillée de la représentativité des émanations de gaz et des écarts de température. Cependant, les mesures thermiques et les mesures des émanations de gaz ont permis sur ce site, de confirmer l'étroite corrélation entre l'activité physico-chimique du site, la production de biogaz et l'activité thermique. La répartition spatiale des mesures thermiques est plus précise même à haute altitude. Des fuites d'extension réduite (ponctuelles) peuvent être mises en évidence par thermographie en réduisant l'altitude de vol.

RÉFLEXIONS SUR LE CHAMP D'APPLICATION DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE DANS LE CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE FRANÇAIS

Cette méthode géophysique fournit des informations à la fois qualitatives et quantitatives. Elle permet de réaliser une reconnaissance rapide, sans contact et non destructive d'un site, avec un degré de précision variable en fonction de l'altitude.

L'optimisation de la distance scène-capteur (c'est-à-dire de l'altitude de vol) permet d'adapter les conditions de mesure aux objectifs préétablis. Un levé à haute altitude permet de couvrir rapidement une grande surface (carte thermique globale du site), alors qu'un survol à basse altitude, focalisé sur des zones plus délimitées, met en évidence des anomalies d'extension réduite (fuites de biogaz, anomalies ponctuelles, foyers ponctuels de combustion, zoom).

Les couvertures des centres de stockage de déchets

Trois principaux concepts de couverture sont admis par la réglementation en vigueur :

- le tombeau étanche, avec un confinement maximum des déchets, qui provoque l'arrêt quasi total de la dégradation anaérobie des déchets (les bactéries responsables de cette dégradation sont consommatrices d'eau). L'activité reprendra si l'intégrité de la couverture n'est pas assurée (notion de pérennité à long terme de l'ouvrage ou défaut de construction).
- le bioréacteur, avec une couverture semi-perméable, qui autorise une alimentation en eau suffisante pour stimuler la dégradation anaérobie des déchets ;

- la solution mixte, par recirculation des lixiviats collectés ou d'eau météorique, sous une membrane étanche.

L'efficacité de ces trois concepts qui présentent des différences très marquées, est liée à la qualité de leur conception mais également à la qualité de leur exécution, qui doit leur assurer une pérennité suffisante. Un défaut de l'étanchéité, difficile à repérer *a priori*, peut avoir des répercussions importantes sur l'évolution de la masse de déchets.

La réglementation en vigueur en France prévoit ainsi que la fermeture d'un site soit accompagnée de la définition d'un programme de surveillance qui s'étend sur une période d'au moins 30 ans. Ce programme peut être révisé et adapté à l'issue des 5 premières années.

L'intégration à ce programme de suivi d'un levé régulier par thermographie infrarouge peut constituer un moyen rapide et intégrant des données spatiales afin de suivre dans le temps l'évolution de la masse de déchets par comparaison d'images successives.

Dans le cas d'un tombeau étanche, l'activité faible des déchets ne doit générer qu'une image thermique peu contrastée par rapport au milieu environnant. Par contre, une défaillance de l'étanchéité devrait conduire à une réactivation des processus et donc à l'apparition d'anomalies thermiques. Cette méthode constitue un moyen de contrôle de l'efficacité de l'étanchéité.

Dans le cas de la barrière semi-perméable, les images thermiques peuvent permettre de suivre la maturation des déchets dans le temps et de localiser des hétérogénéités éventuelles, qu'elles soient liées à la nature des déchets, ou à un défaut de fonctionnement de la couverture.

En ce qui concerne la barrière mixte, les images thermiques peuvent permettre de contrôler la pérennité et l'efficacité de l'étanchéité, mais aussi celle du système de recirculation et sa bonne implantation (la maturation se produit-elle de façon homogène ? Y-a-t-il des zones plus ou moins actives, comment évoluent-elles ?).

Quel que soit le concept de couverture retenu, la thermographie infrarouge peut également être utilisée comme outil de contrôle de l'efficacité et du bon fonctionnement du réseau de collecte de biogaz. Elle peut être utilisée pour optimiser son implantation, mettre en évidence des fuites, ou encore pour orienter son redéploiement (répartition des puits) en fonction des hétérogénéités mises en évidence (accumulation de gaz dans des zones mal drainées).

La carte thermique du site peut également être utilisée pour réaliser des prélèvements ou des mesures de contrôle au sol avec discernement en tenant compte des hétérogénéités de température, dont on a vu qu'elles se corrèlaient relativement bien avec la répartition spatiale des gaz.

La réhabilitation des sites anciens

Cette méthode peut également être intégrée à la panoplie des outils de diagnostic dans le cadre des opérations de réhabilitation, d'audit de site.

Une image thermique d'un site pourra par exemple permettre de mieux cerner l'extension et les contours d'un site mal connu (absence de plans d'exploitation et d'archives). Les déchets fourniront une réponse thermique différente de celle des terrains encaissants, qu'elle soit liée à leur composante fermentescible, ou par différence de nature et de compacité (inertie thermique).

La carte thermique pourra également constituer un élément d'appréciation du degré de maturation des déchets et de l'opportunité d'intégrer la mise en place d'un réseau de collecte des biogaz s'il n'existe pas, ou tout au moins de le compléter.

CONCLUSION

Sur un plan pratique, cette expérimentation conjointe a mis en évidence l'intérêt de la thermographie infrarouge en tant que méthode de diagnostic et de surveillance des décharges. La corrélation entre le degré d'activité des déchets et la température de surface a pu être mise en évidence de façon nette. Des émanations de gaz supérieures à 50 ppm se manifestent sur les images thermiques par des écarts de température supérieurs à 1°C ; des foyers en combustion montrent des écarts de température très largement supérieurs à 10°C. Les images thermiques obtenues permettent d'apprécier avec une bonne précision la localisation des anomalies et leur extension, mais également de suivre leur évolution dans le temps par comparaison de cartes thermiques successives (suivi à long terme prévu par la réglementation française).

Toutefois, cette technique doit être utilisée dans des conditions optimales pour que la qualité des mesures soit la meilleure possible. Il est donc important de réaliser ces mesures dans des conditions climatiques satisfaisantes (pas de pluie, ni de brouillard), en conservant autant que possible une incidence normale entre le capteur et le site étudié. L'acquisition des mesures à

différentes altitudes permettra d'une part d'affiner le contour des anomalies et d'autre part de détecter des anomalies de faible dimension comme des fuites du réseau du réseau de drainage ou la localisation de canalisation. L'altitude doit être fixée afin d'avoir une résolution au sol de 0,5 m pour ce deuxième type de caractérisation. L'acquisition simultanée d'images visibles paraît indispensable pour prendre en compte des artefacts tels que la présence d'engins, de personnels, d'arbres, de bâtiments...

Des mesures réalisées à différents moments de la journée (ou à différentes saisons) permettront d'obtenir des informations complémentaires sur les réponses thermiques du système, son inertie et de faire ressortir des anomalies particulières de faible amplitude.

Les résultats présentés ici ont été confirmés par d'autres campagnes de mesures sur site. Des expériences complémentaires doivent être envisagées dans deux directions :

- établissement d'un lien entre les isothermes et les isovaleurs de teneur en gaz, ce qui nécessiterait une analyse détaillée des émanations de gaz (concentration, composition) et des écarts de température ;
- la recherche d'une définition plus précise des limites de la méthode thermographie infrarouge dans ce domaine particulier d'application, en multipliant notamment les expériences sur des couvertures de structures et d'épaisseurs variables. □

Références bibliographiques

- BERTRAND L., MAJOURAU S., SIRIEIX C. (1997) - L'utilisation des méthodes infrarouges en géologie : rappel des principes - performance actuelles - conditions et exemples d'application. - Demi-journée d'information sur la télédétection, projet national CRITERRE, 11 décembre 1997, FNTP, Paris.
- CANIOU J. (1991) - L'observation et le mesurage par thermographie. - AFNOR, Paris. 381 p.
- CHIARANTINI L., COPPO P., MAZZONI T. (1995) - Biogas emission modelling by means of infrared thermography. - Proceedings Sardinia 95, International Landfill Symposium, 2-6 octobre, CISA, Italy, p. 543-547.
- DE VRIENDT A.B. (1982) - La transmission de la chaleur. - Ed. Gaetan Morin, Chicoutimi, Québec, 395 p.
- GAUSSORGUES G. (1989) - La thermographie infrarouge : principes, technologies, applications. (3^e édition). - Technique et documentation, Lavoisier, Paris, 540 p.
- GOURRY J.-C., SIRIEIX C., BERTRAND L., MATHIEU F. (1995) - 3D diagnosis of a tunnel through infrared thermography combined with ground penetrating RADAR. - SAGEEP 95, Orlando, Floride, 10 p.
- MAZZONI T., CACCHIANI M., CHIARANTINI L. (1993). - Use of thermal infrared images for urban solid waste landfill monitoring. - 13 031 311. Proceedings Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium, CISA, Cagliari, Italy.
- PAJANI D. (1989) - Mesure par thermographie infrarouge. - ADD Ed., Chatenay Malabry, France, 418 p.
- SIRIEIX C. (1994) - Fractures, galeries, infrarouge et analyse d'image. - L'image dans l'enseignement et la recherche, 16-17 juin 1994, SFIMS, Bordeaux. 7 p.
- SIRIEIX C., OUVRY J.-F., ROUVREAU L. (1996) - Localisation des anomalies thermiques sur un centre de stockage de déchets par thermographie infrarouge aérienne. - Symposium International : Protection des sols et dépollution, Bordeaux, 18-20 septembre 1996.
- SIRIEIX C., ROUVREAU L. (1997) - Les images thermiques pour établir un diagnostic de centres de stockages de déchets. - 20^e Réunion de la Section française de la société internationale de stéréologie, 7 février 1997, Paris. 1 p.
- TABBAGH A. (1983) - Choix de la date optimale de prise de vue en prospection thermique aéroportée de structures archéologiques. - *Photointerprétation*, n° 3 ; fascicule 6, Tecnip, Paris.